عیب‌یابی ارتعاشی پوسته‌های استوانه‌ای براساس انحنای شکل مودها*

(یادداشت پژوهشی)

نیما جعفرزاده اقدم[۱] محمد زهساز[۲] مرتضی صادقی[۳]

چکیده *در حال حاضر مطالعات اندکی به عیب‌یابی لوله‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک اختصاص یافته‌است. در سال‌های اخیر انحنای شکل مودها به‌علت حساسیت بالا به عیب، موردتوجه محققان قرار گرفته‌است ولی این روش‌ها نیازمند داده‌برداری متراکم و اسکن ارتعاشی کل سطح می‌باشند که این موضوع استفادهٔ صنعتی از این روش‌ها را بسیار محدود کرده‌است. در این پژوهش روش جدیدی برای عیب‌یابی پوسته‌های استوانه‌ای معرفی گردیده‌است که نیازمند داده سازه سالم نمی‌باشد و داده‌برداری صرفاً در سه راستای طولی پوسته انجام می‌شود. با انتقال اطلاعات آنالیز ارتعاشی سازه به شبکهٔ عصبی، خروجی شبکه مکان دقیق عیب در سطح سازه خواهد بود و به تکنسین ماهر برای تفسیر داده‌ها نیاز ندارد. عملکرد روش پیشنهادی بااستفاده از ورودی‌های جدید و غیر آشنا برای شبکه، صحت سنجی گردید و میزان رگرسیون ۰/۹۷ به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی پوستهٔ استوانه‌ای، انحنای شکل مود، تحلیل المان محدود، شاخص عیب، شبکهٔ عصبی مصنوعی.

Damage Identification of Cylindrical Shells Based on Mode Shapes Curvature

N. Jafarzadeh Aghdam M. Zehsaz M. Sadeghi

Abstract *Currently there are just a few papers about fault detection of tubes and cylindrical shells. Recently, methods based on modal curvatures have gained great attention due to their sensitivity to defects. But the methods require dense number of data extraction points which limits their industrial application. In this research a new method for damage identification of cylindrical shells has been introduced. The method does not need intact structure's data and in contrast to other methods requires a few data extraction points. By transferring the modal information of the structure to the ANN, output of the network is exact position of the defect on the structure and the method does not need skilled technician to interpret the data. Performance of the network is validated by unfamiliar data for the network and 0.97 regression is obtained.*

Key Words Cylindrical Shell;Mode Shape Curvature; Finite Element Analysis; Damage Index; Artificial Neural Network

*تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۱۸ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/۱۱/۸ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.58045

(۱) دانشجوی دوره دکتری، مهندسی مکانیک، RWTH-Aachen University، آلمان. nima.aghdam@sla.rwth-aachen.de

(۲) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

مقدمه

بسیاری از سازه‌های موجود در صنایع را می‌توان به‌عنوان پوسته‌استوانه‌ای قلمداد نمود ازجمله محفظه‌های فضایی، مخازن تحت فشار، بویلرها و غیره. باوجود کاربرد وسیع پوسته‌های استوانه‌ای مطالعات اندکی برروی عیب‌یابی این سازه‌ها انجام شده‌است. شکست ناگهانی این سازه‌ها منجر به فجایع و ضررهای مالی و جانی جبران‌ناپذیری می‌شود. جلوگیری از شکست ناگهانی این سازه‌ها، نیازمند شناسایی عیوب سازه‌ای ازجمله ترک‌ها، خوردگی و غیره در مراحل ابتدایی ایجاد آنها می‌باشد. روش‌های غیرمخرب بسیاری ازجمله روش‌های فراصوت و اشعهٔ ایکس برای سازه‌های ساده، توسعه یافته‌اند و مورداستفاده در صنایع می‌باشند. در اغلب موارد برای استفاده از این روش‌ها باید مکان تقریبی عیب مشخص باشد و همچنین این روش‌ها زمان‌بر هستند و مهم‌تر از همه نیازمند تکنسین‌های ماهر برای تفسیر داده‌های اخذشده می‌باشند [1].

روش‌های دینامیکی از روش‌های کم‌هزینه به‌حساب می‌آیند و به‌علت قابلیت حمل تجهیزات آنها، در بحث عیب‌یابی به‌هنگام همواره از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده‌اند. در مبحث عیب‌یابی توسط مشخصات ارتعاشی سازه، استفاده از فرکانس‌های طبیعی با مشکلاتی مواجه است، زیرا در اثر بروز عیب میزان تغییرات فرکانس طبیعی کم است و همچنین تعیین مکان عیب توسط آن نیازمند استفاده از تکنیک‌های پیچیده می‌باشد. علاوه‌بر آن شرایط محیطی برروی فرکانس‌های طبیعی سازه بسیار تأثیرگذار است [2]. ترابی و همکاران [3] روشی برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی بااستفاده از فرکانس طبیعی اول تیر و به‌کارگیری یک تکیه‌گاه متحرک معرفی کرده‌اند. با جابه‌جا کردن تکیه‌گاه در طول تیر در هر مرحله مقدار فرکانس طبیعی اول سازه استخراج می‌گردد. با رسیدن تکیه‌گاه متحرک به محل عیب نوسان شدیدی در مقدار فرکانس طبیعی اول دیده می‌شود. علی‌رغم دقت بالای روش در یافتن عیوب کوچک استفاده از این روش برای سازه‌های پیچیده‌تر مانند پوسته‌های استوانه‌ای با دشواری همراه است و روش برای عیب‌یابی در محل مناسب نمی‌باشد. روش دیگری برپایهٔ تغییرات فرکانس‌های طبیعی برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی توسط ترابی و همکاران [4] معرفی شده‌است. در این تحقیق نتایجی درمورد تأثیر عیب برروی شکل مودها ارائه شده‌است. اما در بسیاری از موارد عیوب تغییرات شدیدی برروی شکل مودها ایجاد نمی‌کنند و حتی با اندازه‌گیری تراکم بالا، شکل مودها حساسیت زیادی به عیوب نشان نمی‌دهند [5].

بسیاری از روش‌های عیب‌یابی دینامیکی نیازمند اطلاعات مربوط به سازهٔ سالم برای تشخیص عیب هستند. اغلب دسترسی به اطلاعات سازهٔ سالم امکان‌پذیر نمی‌باشد و این موضوع سبب عدم امکان استفاده از این روش‌ها در بسیاری از موارد شده‌است.

یکی دیگر از اشکالات مرتبط با روش‌های عیب‌یابی دینامیکی حساسیت کم نسبت به عیوب کوچک است [6]. با ابداع روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر انحنای شکل مودها، حساسیت بالای این روش‌ها نسبت به عیوب توجه محققان را جلب نموده‌است. فن و کیائو [2] مرور جامعی از روش‌های عیب‌یابی براساس مشخصات ارتعاشی سازه ارائه کردند. در این پژوهش روش استفاده از انحنای شکل مودها روشی کارا در عیب‌یابی ارزیابی گردیده‌است. کیائو و همکاران [7] از سه روش مختلف مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی تیرها استفاده نموده‌اند. هی و همکاران [8] روشی مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی تیرهای کامپوزیتی معرفی کرده‌اند که باوجود محدودیت‌هایی قابلیت تشخیص عیوب متعدد و شدت آنها را دارد. کیائو و همکاران [1] در تحقیق دیگری از سه روش مختلف مبتنی بر انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی صفحات کامپوزیتی استفاده

کردند. نویسندگان حساسیت بالای انحنای شکل مودها نسبت به بروز عیب را گزارش نموده‌اند. ژو و همکاران [9] روش جدیدی براساس انحنای شکل مود اصلی، میانگین و گاوسین برای عیب‌یابی ورق‌ها معرفی کرده‌اند که عملکرد خوبی درمقابل نویز دارد. این روش نیازمند اسکنر ارتعاشی کل سطح ورق می‌باشد.

ژیانگ و همکاران [10] از روش ترکیبی انحنای شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی برای مکان‌یابی و تخمین شدت عیب برروی پوسته‌های مخروطی استفاده کردند. کاربرد روش مذکور برروی پوسته‌های استوانه‌ای نیز بررسی شده‌است. در این روش از تبدیل موجک (Transform Wavelet) برای مکان‌یابی عیب استفاده شده‌است. علی‌رغم دقت بالای روش مذکور در مکان‌یابی عیب در طول پوسته، مکان‌یابی عیب برروی محیط پوسته توسط این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در مقاله‌ای دسی و کامرلنگو [5] مرور جامعی بر روش‌های مبتنی بر انحنای شکل مودها داشتند و روش‌های مختلف را مقایسه کردند و معایب و مزایا هریک را بیان نمودند.

با بررسی ادبیات فن، یکی از مهم‌ترین نواقص موجود در روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر انحنای شکل مودها، نیاز به اسکن و داده‌برداری از تمامی نقاط سطح سازه می‌باشد که این موضوع منجر به زمان‌بربودن و درنتیجه نامناسب‌بودن روش‌های فوق برای مصارف صنعتی شده‌است. اندکی کاهش در تعداد نقاط موردنیاز داده‌برداری سبب ارجحیت‌یافتن یک روش نسبت به سایر روش‌ها می‌گردد. در این تحقیق روش جدیدی برای عیب‌یابی پوسته‌های استوانه‌ای بااستفاده از تجهیزات قابل حمل و با تعداد اندکی داده‌برداری معرفی گردیده‌است.

در پژوهش حاضر ابتدا پوستهٔ استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی می‌شود، سپس با ایجاد عیب در قسمت‌های مختلف سازه مقادیر انحنای شکل مودها در سه راستا در طول سازه استخراج می‌گردد و پس‌از اعمال الگوریتم عیب‌یابی برای آموزش شبکهٔ عصبی مورداستفاده قرارمی‌گیرد. باتوجه به ویژگی یادگیری و تعمیم شبکه‌های عصبی، پس از آموزش شبکه، با داشتن اطلاعات آنالیز ارتعاشی مربوط به سه امتداد سازهٔ واقعی، مکان‌یابی سریع عیب در تمام نقاط محیط پوستهٔ استوانه‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی لولهٔ مورداستفاده برای شبیه‌سازی [11]

مدول‌الاستیک (GPa)	چگالی (kg/m^3)	ضریب پواسون
210	7850	0.3

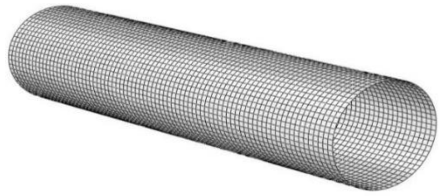
جدول ۲ ابعاد لولهٔ مورداستفاده برای شبیه‌سازی

اندازه (in) اسمی لوله	طول لوله(m)	قطر بیرونی(mm)	ضخامت(mm)
8	0.8	219.08	7.04

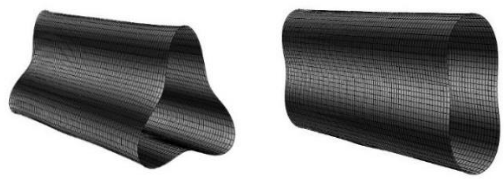
شبیه‌سازی پوستهٔ استوانه‌ای

با رجوع به استاندارد ای‌اس‌تی‌ام مربوط به ساخت لوله-های بدون درز و باتوجه به کاربرد وسیع این لوله‌ها در صنایع پتروشیمی برای شبیه‌سازی از لولهٔ فولادی) گرید ب استفاده شد. این لوله‌ها در شرایط A106(کاری تحت فشار و دمای بالایی قرار می‌گیرند. مشخصات مکانیکی لوله در جدول (۱) و ابعاد لولهٔ شده در جدول (۲) ذکر شده‌است. شرایط سازی‌شبیه آزاد برای مدل اعمال شده‌است. سردو تکیه‌گاهی بااستفاده از ۵۲۰۰ المان پوسته ٤ نقطه‌ای دو انحنا، با زنی می‌شود. حداکثر طول المان ۱۰ میلی‌متر، مدل مش شدهٔ سازه نمایش داده زنی‌در شکل (۱) مدل مش شده‌است. برای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها از روش لانکسوز استفاده می‌شود و ۱۳ شکل مود طبیعی اول سازه استخراج می‌گردد. (به‌علت اعمال شرایط مرزی دوسرآزاد، سازه دارای ٦ مود صلب می‌باشد). انتخاب شکل مود برای انجام آزمون

عیب‌یابی، در میزان حساسیت روش تأثیر به‌سزایی دارد. درصورت قرارگیری عیب برروی نقاط اکسترمم شکل مود، امکان شناسایی عیب بیشتر است. به‌منظور افزایش حساسیت روش عیب‌یابی از مجموع داده‌های انحنای شکل مود مربوط به دو مود هفتم (۱۳۰۸)، برای (Hz(٤٦١/٩ و سیزدهم ((Hz)) عیب‌یابی استفاده می‌شود (شکل ۲).



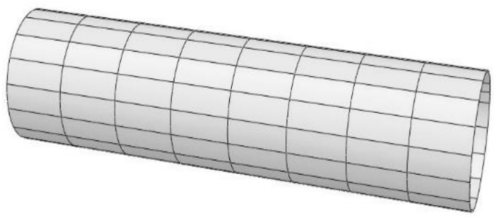
شکل ۱ مدل مش‌زنی‌شدهٔ پوستهٔ استوانه‌ای



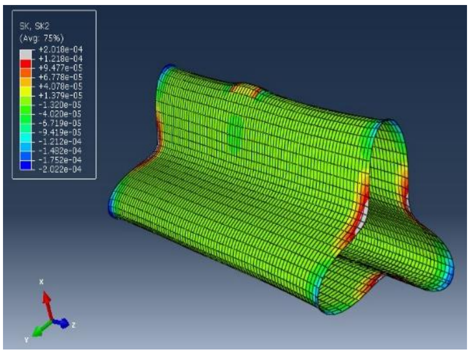
ب الف

شکل ۲ الف) شکل مود ارتعاشی هفتم پوستهٔ استوانه‌ای
ب) شکل مود ارتعاشی سیزدهم پوستهٔ استوانه‌ای

شبیه‌سازی عیب. خوردگی یکی از متداول‌ترین نوع عیوب مربوط به لوله‌ها و مخازن است. برای شبیه‌سازی عیب، طول لولهٔ شبیه‌سازی‌شده، به ۸ حلقهٔ برابر و محیط آن بااستفاده از خطوط طولی به ۱٦ قسمت تقسیم‌بندی می‌شود؛ به‌این‌ترتیب درمجموع سطح لوله به ۱۰۸ قسمت تقسیم می‌شود (شکل ۳). مقدار ضخامت پوسته ۷/۰٤ میلی‌متر اعمال می‌گردد. برای شبیه‌سازی عیب خوردگی، مقدار ضخامت یکی از ۱۰۸ قسمت سطح به‌اندازهٔ ۲ میلی‌متر کاهش داده می‌شود. با این روش شبیه‌سازی عیب، نیاز به مش‌زنی مجدد سازه نمی‌باشد که این امر در بحث مقایسهٔ نتایج حاصل‌شده بسیار حائز اهمیت است زیرا ایجاد هرگونه تغییر در مش‌ها باعث تغییر نتایج تحلیل المان‌محدود خواهد شد. باتوجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، انحنای شکل مود طبیعی سازه به‌طور مستقیم قابل استخراج است. درصورت عدم دسترسی به داده‌های انحنای شکل مود، نیاز به استفاده از روش تقریب میانی بر داده‌های جابه‌جایی مودال برای استخراج داده‌های انحنا پیش می‌آید که این روش در مقالهٔ [12] به‌طور کامل توضیح داده شده‌است. در شکل (٤) نمونه‌ای از مقادیر انحنای شکل مود برروی سازهٔ معیوب نشان داده شده‌است. تغییرات انحنا در اطراف منطقهٔ معیوب قابل‌توجه است.



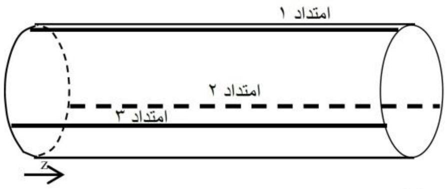
شکل ۳ مدل تقسیم‌بندی‌شدهٔ پوستهٔ استوانه‌ای (طول مدل به ۸ حلقه و محیط پوسته به ۱٦ قسمت مساوی تقسیم‌بندی شده‌است)



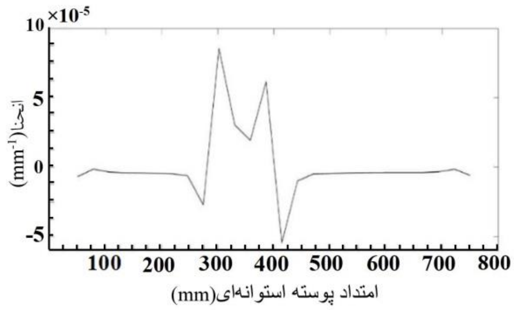
شکل ٤ کانتور میزان انحنای حاصل از تحلیل المان محدود (تغییرات انحنا در مکان عیب (حد فاصل ۳۰۰ الی ٤۰۰ میلی‌متری طول پوسته) مشهود است)

استخراج نتایج شبیه سازی المان‌محدود. طبق روش پیشنهادی در این پژوهش؛ برای کاهش تعداد نقاط مورد نیاز داده‌برداری، صرفاً در نقاط واقع برراستای سه امتداد و به‌فاصلهٔ ۱۲۰ درجه از یکدیگر مقادیر انحنای شکل مودها استخراج می‌گردد (شکل ۵). به‌منظور

نزدیک کردن روش المان‌محدود بـه روش داده‌بـرداری تجربی، در هر یک از سه امتداد، صرفاً در ۲۶ نقطه (بـه فاصلهٔ ۲۸ میلی‌متر) داده‌هـا اسـتخراج مـی‌شـود. نقطـهٔ آغازین و انتهایی داده‌برداری (نقطهٔ ۱ و ۲۶) در فاصـلهٔ ۵۰ میلی‌متری از دو انتهای لوله واقع شده‌اند. نمونـه‌ای از نمودار انحنای شکل مود سازهٔ معیوب در شـکل (٦) نشان داده شده‌است.



شکل ۵ امتداد سه مسیر داده‌برداری در طول پوستهٔ استوانه‌ای



شکل ٦ نمودار تغییرات انحنای حاصل از تحلیل المان محدود (مکان عیب در مسیر امتداد دوم داده‌برداری و برروی حلقهٔ چهارم، حد فاصل ۳۰۰ الی ٤۰۰ میلی‌متری در طول پوسته)

استفاده از الگوریتم عیب‌یابی

در دههٔ اخیر تعداد زیادی از محققان توجه خویش را به ابداع الگوریتم‌های عیب‌یابی برپایهٔ انحنای شـکل مـودهـا معطـوف داشـته‌انـد. تقریبـاً در تمـام مقـالات بااستفاده از روش‌های تجربـی و عـددی کـارایی روش پیشنهادشده صحت‌سنجی شده‌است. کیائو و همکـاران مقایسه‌ای بین سه روش معروف مبتنی بر انحنای شکل مود؛ ابعاد انکساری تعمیم‌یافته (Generalized Fractal Dimension)، روش انـرژی کرنشـی و روش صـافی سـطح شـکاف‌دار (Gapped Smoothing Method) بـرروی تیرهـا انجـام داده‌انـد [7]، نویسـندگان اعـلام کرده‌اند که روش انرژی کرنشی و روش صـافی سـطح شکاف‌دار نتایج بهتری داشته‌است. به‌خصـوص درطـی آزمایش تجربی عملکرد بهتر روش‌های مذکور مشـهود است. در پژوهش حاضر نیز با انتقال داده‌هـای انحنـای شکل مود به محـیط نـرم‌افـزار متلـب از روش صـافی سطح شکاف‌دار برای عیب‌یابی استفاده شـده‌اسـت. در این روش با برازش موضعی منحنی چندجمله‌ای درجه سه به مقادیر انحنای نقاط هم‌جوار هر نقطه و محاسـبهٔ اخـتلاف آن بـا انحنـای همـان نقطـه، شـاخص عیـب محاسبه می‌گردد. مفهوم انحنـا، معکـوس شـعاع انحنـا می‌باشد. برای مثال مقدار انحنا مربوط به المان iام؛ Ci، در مکان xi در طول سازه بااستفاده از برازش منحنی از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید:

$$C_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3 \qquad (۱)$$

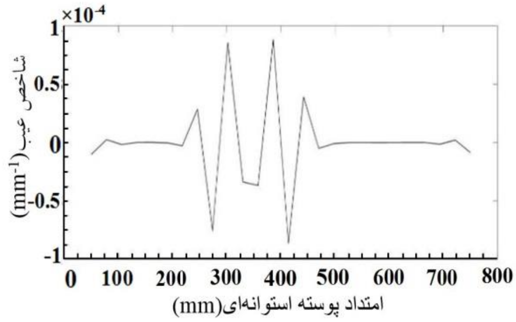
کـه در ایـن رابطـه مقـادیر ضـرایب؛ a_0, a_1, a_2 و a_3 بـا برازش منحنی درجه سه برروی مقـادیر انحنـای شـکل مـود مربـوط بـه دو نقطـهٔ قبـل و بعـد از نقطـهٔ iام؛ (C_{i-2}، C_{i-1}، C_{i+1} و C_{i+2}) محاسبه می‌گردد. برای نقطه اول از داده‌هـای C_2, C_3, C_4, C_5 و بـرای نقطـهٔ دوم از داده‌های نقـاط C_1, C_3, C_4, C_5 اسـتفاده مـی‌شـود. روال مشـابه بـرای محاسـبهٔ انحنـا در دو نقطـهٔ آخـر اتخـاذ مـی‌گـردد. شـاخص عیـب هـر نقطـه، تفاضـل مقـدار محاسبه‌شده ازطریـق بـرازش منحنـی و مقـدار واقعـی انحنای نقطهٔ موردنظر می‌باشد. مقدار شاخص عیب هر نقطه از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌گردد:

$$\delta_i = (a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + a_3 x_i^3) - C_i \qquad (۲)$$

بـرای هـر یـک از نقـاط واقـع بـر سـه امتـداد داده‌برداری، مقدار شاخص عیب محاسـبه مـی‌گـردد و نمودار مقادیر شاخص عیب در سه امتـداد طـول سـازه

به‌دست می‌آید.

نمونه‌ای از نمودار شاخص عیب؛ محاسبه‌شده به‌روش صافی سطح شکاف‌دار، در شکل (۷) نشان داده شده است. باتوجه به مکان بروز عیب و فاصلهٔ هر یک از امتدادهای داده‌برداری از مکان عیب، میزان شاخص عیب در طول سه امتداد داده‌برداری متفاوت می‌باشد. درادامه از این موضوع برای آموزش شبکهٔ عصبی به‌منظور تشخیص مکان عیب در تمام نقاط محیط پوسته استفاده می‌شود.



شکل ۷ نمودار شاخص عیب به‌طول پوستهٔ استوانه‌ای- مکان عیب در مسیر امتداد دوم داده‌برداری و برروی حلقهٔ ٤ام (حد فاصل ۳۰۰ الی ٤۰۰ میلی‌متری پوسته)

شبکهٔ عصبی

شبکه‌های عصبی به‌عنوان مدل‌های ساده‌سازی‌شده برپایهٔ نحوهٔ یادگیری بیولوژیکی مغز انسان توسعه یافته‌اند. یک شبکهٔ عصبی مصنوعی شامل تعدادی نورون‌های پردازنده می‌باشد که به یکدیگر متصل‌اند و در یک لایه از شبکه جمع شده‌اند. باوجود روش‌های معدود محاسباتی، تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نورون‌های هر لایهٔ مخفی اغلب بااستفاده از روش آزمون‌وخطا تعیین می‌گردد [13]. شبکه‌های عصبی توانمندی بالایی در برازش منحنی برروی داده‌ها دارند. شبکه‌های چند لایه با داشتن تعداد نورون کافی، قابلیت برازش منحنی برروی هر مجموعهٔ داده‌ای را دارند [14]. در این پژوهش از شبکهٔ عصبی پرسپترون چندلایه؛ که یک شبکهٔ پیشخور محسوب می‌شود استفاده شده‌است. این شبکه برای برازش منحنی بسیار متداول است. در شبکه‌های عصبی مورداستفاده در پژوهش حاضر تابع تبدیل لایه‌های مخفی تانژانت هیپوربولیک می‌باشد. الگوریتم آموزش پس‌انتشار برای شبکه‌های چندلایه، برپایهٔ الگوریتم مینیمم خطای مربعات می‌باشد و روش آموزش، نظارتی به‌حساب می‌آید که در آن آموزش از طریق مجموعه‌ای از داده‌های آموزشی انجام می‌گیرد. روش پس‌انتشار مشابه با روش مینیمم خطای مربعات از شاخص عملکرد میانگین مربع خطا استفاده می‌کند [14]. برای آموزش سریع شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی مورداستفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ مارکوارد (Levenberg Marquardt optimization) استفاده شده‌است.

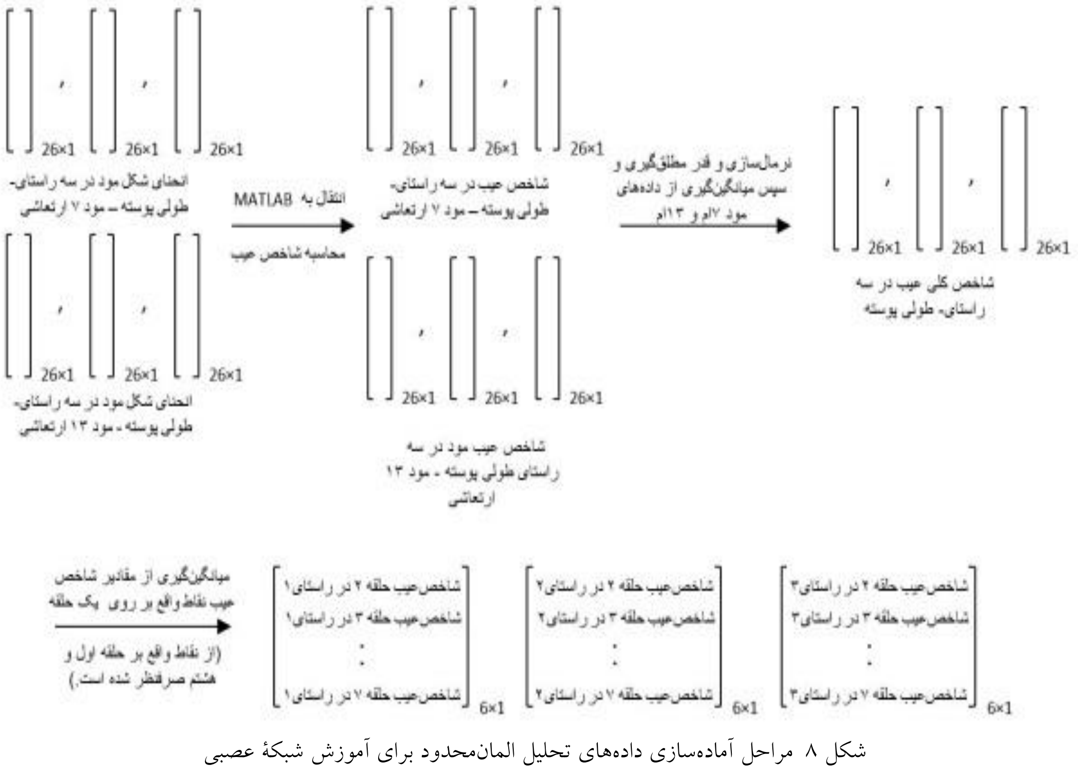
دسته‌بندی داده‌های ورودی به شبکهٔ عصبی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا که به‌طور مستقیم بر میزان انطباق و رگرسیون شبکه تأثیرگذار است.

به‌منظور به‌دست‌آوردن داده‌های لازم برای آموزش شبکهٔ عصبی، ضخامت یکی از قسمت‌های روی پوستهٔ استوانه‌ای ۲ میلی‌متر کاهش داده می‌شود. در این پژوهش پوستهٔ شبیه‌سازی‌شده، مشتمل بر ۸ حلقه به‌ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر است که حلقهٔ ابتدایی و انتهایی به‌جهت نزدیکی به شرایط مرزی مدنظر عیب‌یابی نمی‌باشند (شکل ۳). مکان عیب برروی قسمت‌های واقع بر حلقهٔ دوم تا حلقهٔ هفتم (فاصلهٔ ۱۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متری طول پوسته) جابه‌جا می‌شود و در ۹٦ مکان مختلف عیب، مقادیر انحنای شکل مود نقاط در مودهای ارتعاشی هفتم و سیزدهم استخراج می‌گردد. در هر امتداد، داده‌برداری از ۲٦ نقطه در طول پوسته انجام شده‌است. که درمجموع برای یک مکان مشخص عیب، برای هر یک از مودهای ارتعاشی، ۳ ماتریس ۲٦ در ۱ استخراج گردیده‌است. تمامی داده‌های مربوط به انحنا به نرم‌افزار متلب منتقل می‌شود و پس‌از به‌دست آوردن شاخص‌های عیب، هر یک از ماتریس‌ها، نرمال‌سازی می‌شود و قدر مطلق آنها ثبت

می‌گردد. سپس مقادیر شاخص‌های عیب مرتبط با مود هفتم و سیزدهم میانگین‌گیری می‌شود که درنتیجه برای هر حالت بروز عیب ۳ ماتریس ۲۶ در ۱ شاخص عیب، مرتبط با سه امتداد داده‌برداری محاسبه می‌گردد. با صرف‌نظر کردن از حلقه‌های شمارهٔ ۱ و ۸ پوسته، هر یک از امتدادهای داده‌برداری از ٦ حلقهٔ محیطی پوسته عبور می‌کند. درمورد هر یک از امتدادهای داده‌برداری، از مقادیر شاخص عیب ۲٦ نقطهٔ داده‌برداری، مقادیر شاخص عیب نقاطی که برروی یک حلقه واقع شده‌اند میانگین‌گیری می‌شود و برای هر امتداد یک مقدار مشخص شاخص عیب مرتبط با هر حلقه (ماتریس ٦ در ۱) به‌دست می‌آید. و درنهایت برای هر مکان عیب ۳ ماتریس ٦ در ۱ شاخص عیب حاصل می‌گردد. مراحل محاسبهٔ داده‌ها برای آموزش شبکهٔ عصبی در شکل (۸) نیز ارائه شده‌است.

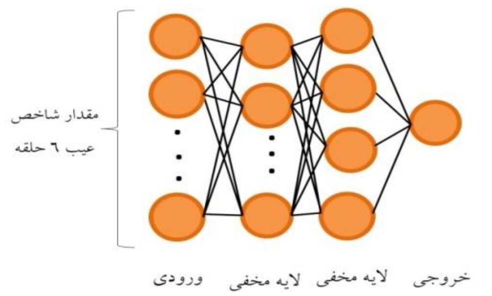
کاهش تعداد مشخصه‌های ورودی به شبکهٔ عصبی، به‌علت کاهش پیچیدگی شبکه، سبب افزایش میزان انطباق شبکه می‌شود. بدین منظور از دو شبکهٔ عصبی مجزا برای مکان‌یابی دقیق عیب در طول و محیط پوسته استفاده می‌گردد.

آموزش شبکهٔ عصبی برای مکان‌یابی عیب در طول پوستهٔ استوانه‌ای. برای هر حالت بروز عیب، مقادیر شاخص عیب (سه ماتریس ٦ در ۱) مرتبط با هر امتداد با یکدیگر جمع ماتریسی می‌شود. نتیجهٔ یک ماتریس ٦ در ۱ است که هر یک از اعضای ماتریس مقدار شاخص عیب کلی مرتبط با هر حلقه می‌باشد. از این ماتریس به‌عنوان ورودی شبکه استفاده می‌شود. این شبکه دارای یک خروجی مرتبط با مکان طولی عیب می‌باشد. با نزدیک‌شدن مکان عیب به یک حلقه، عدم صافی سطح برروی نودهای واقع بر این حلقه محسوس‌تر می‌شود و شاخص عیب این حلقه بیشتر از حلقه‌های جانبی خواهد بود. شبکهٔ عصبی با یادگیری رفتار و تغییرات مقادیر شاخص عیب‌ها الگویی از نحوهٔ تغییرات ایجاد می‌کند و قابلیت مکان‌یابی عیب در کل طول پوستهٔ استوانه‌ای را خواهد داشت.

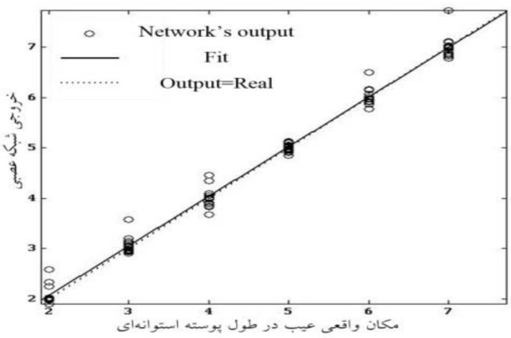


شکل ۸ مراحل آماده‌سازی داده‌های تحلیل المان‌محدود برای آموزش شبکهٔ عصبی

از ۹٦ دادهٔ موجود ٦٦ داده برای آمـوزش شـبکه و ۱۵ داده برای صـحت‌سـنجی و ۱۵ داده بـرای آزمـودن شبکه به‌طور اتفاقی انتخاب شده و مورد اسـتفاده قـرار گرفته‌اند. با روش آزمون‌وخطا تعـداد بهینـهٔ لایـه‌هـا و نورون‌های لایه‌های مخفی به‌دست مـی‌آیـد. بـرای هـر پیکربندی مشخص شبکه ٤٠ شبکهٔ عصبی آموزش داده می‌شود و با میانگین‌گیری از عملکرد شبکه‌ها و مقایسهٔ نتایج، بهترین پیکربندی شبکه استخراج می‌گردد. شبکهٔ عصبی سه لایه با ٥ نورون در لایـهٔ اول و ٤ نـورون در لایـهٔ دوم بهتـرین عملکـرد را نشـان مـی‌دهـد. بـرای پیکربندی ذکرشـده، میـزان رگرسـیون بـرای داده‌هـای آموزشـی۰/۹۹۷، داده‌هــای صــحت‌ســنجی ۰/۹۹۲ و داده‌های آزمون ۰/۹۹ است و رگرسیون بـرای مجمـوع کـل داده‌هـا ۰/۹۹۵ مـی‌باشـد. در شـکل (۹) تصـویر پیکربندی شـبکه و در شـکل (۱۰) نمـودار رگرسـیون شبکه برای داده‌های آزمون آمده‌است.



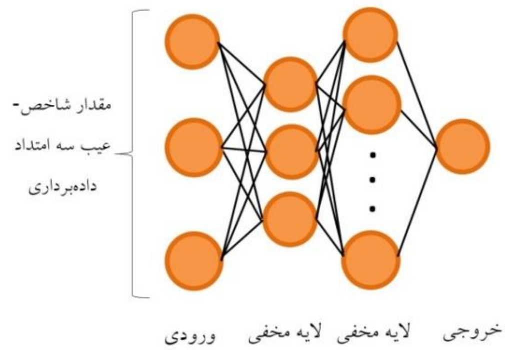
شکل ۹ پیکربندی شبکهٔ عصبی برای مکان‌یابی عیب در طول پوستهٔ استوانه‌ای



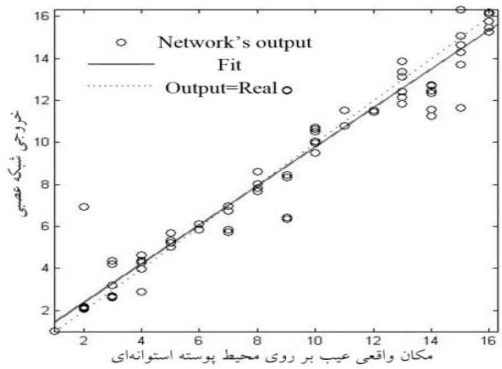
شکل ۱۰ نمودار رگرسیون برای کل داده‌های ورودی به‌جهت تعیین عیب در طول پوسته (مقدار خطای داده‌های آزمون برابر با ۰/۹۹ است)

آموزش شبکهٔ عصبی برای مکان‌یابی عیب در محیط پوستهٔ استوانه‌ای. برای این شبکه، یک مقـدار (عـدد) به‌عنوان شـاخص عیـب بـرای هـر یـک از سـه امتـداد داده‌برداری مرتبط می‌گردد. برای هر حالت بروز عیب، اعضای ماتریس ٦ در ۱ مرتبط با یـک امتـداد (مقـادیر شاخص عیب) با یکـدیگر جمـع جبـری مـی‌شـوند و مقدار شاخص عیب کلی مربوط به آن امتداد بـه‌دسـت می‌آیـد. مقـادیر شـاخص عیـب سـه امتـداد درنهایـت بـه‌صـورت یـک مـاتریس ۳ در ۱ ثبـت مـی‌گردنـد. از ماتریس مـذکور بـه‌عنـوان ورودی شـبکهٔ دوم اسـتفاده می‌شود. شـبکه دارای یـک خروجـی مـرتبط بـا مکـان قرارگیـری عیـب در محـیط حلقـهٔ معیـوب مـی‌باشـد. درصـورت قرارگـرفتن عیـب بـین دو امتـداد، مقـادیر شاخص عیب مرتبط به ایـن دو امتـداد بـیش از امتـداد سوم (امتداد دورتر) به‌دست مـی‌آیـد. بـا نزدیـک‌شـدن مکان عیب به هر یک از امتـدادهای داده‌بـرداری، عـدم صافی سطح ناشی از حضور عیب برروی نودهای ایـن امتداد محسوس‌تر خواهد بود و مقـدار شـاخص عیـب مرتبط بـا ایـن امتـداد بیشـتر اسـت. شـبکهٔ عصـبی بـا یادگیری رفتـار و تغییـرات مقـادیر شـاخص عیـب‌هـا الگویی از نحوهٔ تغییرات ایجاد می‌کند و پس‌از آموزش همانند جعبهٔ سیاهی عمل می‌کند و با دریافت مـاتریس عیب امتـدادها، مکـان عیـب را در کـل محـیط پوسـتهٔ استوانه‌ای تشخیص می‌دهد. باتوجه به قـدرت بـرازش شبکهٔ عصبی، شـبکه قـدرت تشـخیص مکـان عیـوب غیرآشنا برای شبکه را نیز دارا است. طبـق روال شـبکهٔ عصبی پیشین تعداد داده‌های موجود به‌طور اتفـاقی بـه سـه دسـتهٔ آمـوزش، صـحت‌سـنجی و آزمـون تقسـیم می‌شود. با روش آزمون و خطا تعـداد بهینـهٔ لایـه‌هـا و نورون‌های لایه‌های مخفی به‌دست مـی‌آیـد. بـرای هـر پیکربندی مشخص شبکه ٤٠ شبکهٔ عصبی آموزش داده می‌شود و با بررسی میانگین عملکـرد شـبکه‌هـا شـبکهٔ

عصبی سه‌لایه، با ۳ نورون در لایۀ اول و ۵ نورون در لایۀ دوم بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. میزان رگرسیون برای داده‌های آموزشی ۰/۹۶۹، داده‌های صحت‌سنجی ۰/۹۷۸ و داده‌های آزمون ۰/۹۷۸ است و میزان رگرسیون برای مجموع کل داده‌ها ۰/۹۷ می‌باشد. در شکل (۱۱) تصویر پیکربندی شبکه و در شکل (۱۲) نمودار رگرسیون شبکه برای داده‌های آزمون آمده‌است.



شکل ۱۱ پیکربندی شبکۀ عصبی برای مکان‌یابی عیب در محیط پوستۀ استوانه‌ای



شکل ۱۲ نمودار رگرسیون برای کل داده‌های ورودی به‌جهت تعیین عیب در محیط پوسته (مقدار خطا کل داده‌های آزمون برابر با ۰/۹۷۸ است)

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر روش جدیدی براساس انحنای شکل مودها برای عیب‌یابی پوسته‌های جدارنازک معرفی شده‌است. تعداد بالای نقاط موردنیاز برای داده‌برداری و نیاز به اسکنر ارتعاشی از معایب عمده روش‌های عیب‌یابی برپایۀ انحنای شکل مودها می‌باشد. روش معرفی‌شده با هدف کاهش تعداد نقاط داده‌برداری و افزایش سرعت عیب‌یابی برای کاربردی کردن روش عیب‌یابی درجهت مصارف صنعتی طراحی گردیده‌است.

در این پژوهش با شبیه‌سازی پوستۀ جدارنازک توسط نرم‌افزار آباکوس و ایجاد عیب برروی مدل، داده‌های مربوط به انحنای شکل مود در سه راستای طولی لوله استخراج گردید. عیب برروی سطح سازه جابه‌جا شد و داده‌های مربوط به انحنا در هر مرحله استخراج شدند. با تحلیل داده‌ها بااستفاده از روش عیب‌یابی صافی سطح‌شکاف‌دار، مقادیر شاخص عیب برای هر راستا محاسبه گردید. از مقادیر شاخص عیب جهت آموزش شبکۀ عصبی استفاده شد. به‌منظور کاهش پیچیدگی شبکه و درنتیجه افزایش قدرت شبکه در برازش منحنی، از دو شبکۀ عصبی مستقل که به‌طور موازی با هم عمل می‌کنند جهت مکان‌یابی عیب استفاده گردید. با برازش منحنی بر داده‌ها، میزان انطباق بالایی مشاهده شد. مقدار رگرسیون شبکه‌های عصبی برای داده‌های غیرآشنای شبکه (داده‌های آزمون) به‌جهت مکان‌یابی عیب در طول و محیط پوستۀ استوانه‌ای به‌ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۷۸ به‌دست آمد. بااستفاده از روش پیشنهادی این پژوهش و باتوجه به قدرت یادگیری و تعمیم شبکه‌های عصبی، با داشتن داده‌های مربوط به انحنای شکل مود در سه راستای طولی پوستۀ استوانه‌ای، امکان تشخیص و مکان‌یابی سریع عیب در کل نقاط سازه مقدور می‌شود. استفادۀ هم‌زمان از دو شکل مود میزان دقت روش عیب‌یابی را افزایش داده‌است.

پس از یک مرتبه آموزش شبکۀ عصبی برای یک سازۀ مشخص، عیب‌یابی در طول عمر سازه به‌سرعت انجام می‌شود. خروجی شبکه مکان دقیق عیب است و نیاز به تکنسین ماهر برای تفسیر داده‌ها نمی‌باشد. درمورد سازه‌های فضایی به‌علت ظرفیت بسیار محدود

انــرژی بــرای پــردازش و همچنــین ظرفیــت محــدود ذخیره‌سازی اطلاعات بـا بهـره‌گیـری از نتـایج تحقیـق حاضر و باتوجه به سرعت بالای پردازش در شبکه‌های عصبی، دیگر نیاز به ذخیره‌سـازی و ارسـال داده‌هـا بـه زمین برای تحلیـل نمـی‌باشـد. ازطرفـی عـدم نیـاز بـه داده‌های سازهٔ سالم بـرای مقایسـه، بـه‌خصـوص بـرای سازه‌های فضایی که تغییرات درجهٔ حـرارت بـالایی را تجربه می‌کنند از اهمیـت بـالایی برخـوردار اسـت. در روش پیشنهادی مقاله، در لحظهٔ عیب‌یابی، سازه صـرفاً با خود مقایسه می‌شود و شاخص عیب نقـاط محاسـبه می‌گردد و شرایط محیطی برروی روش کاملاً بـی‌تـأثیر اسـت. در پـژوهش‌هـای آتـی نویسـندگان بـه بررسـی تجربی این روش خواهند پرداخت.

مراجع

1. Qiao, P., Lu, K., Lestariand, W. and Wang, J. "Curvature Mode Shape-based Damage Detection in Composite Laminated Plates", *Composite Structures*, Vol. 80, No. 3, pp. 409-428, (2007).
2. Fan, W. and Qiao, P., "Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study", *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111, (2011).
3. Torabi, K., Shariati-Nia, M. and Heidari-Rarani, M., "Moving Support Technique for Delaminatoin Detection in Laminated Composite Beams Using the First Natural Frequency", J*ournal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 1116-1128, 0731684417703489, (2017).
4. Torabi, K., Shariati-Nia, M. and Heidari-Rarani, M., "Experimental and Theoretical Investigation on Transverse Vibration of Delaminated Cross-ply Composite Beams", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 115, pp. 1-11, (2016).
5. Dessi, D. and Camerlengo, G., "Damage Identification Techniques Via Modal Curvature Analysis: Overview and Comparison", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 52, pp. 181-205, (2015).
6. Giurgiutiu, V., "Structural Health Monitoring (SHM) of Aerospace Composites", *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, pp. 449–507, (2015).
7. Qiao, P., Lestari, W., Shah, M.G. and Wang, J. "Dynamics-based Damage Detection of Composite Laminated Beams Using Contact and Noncontact Measurement Systems", *Journal of Composite Materials*, Vol. 41, No. 10, pp. 1217-1252, (2007).
8. He, M., Yang, T. and Du, Y.,"Nondestructive Identification of Composite Beams Damage Based on the Curvature Mode Difference", *Composite Structures*, Vol. 176, pp. 178-186, (2017).
9. Xu, Y., Zhu, W. and Smith, S., "Non-model-based Damage Identification of Plates Using Principal, Mean and Gaussian Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 400, pp. 626-659, (2017).
10. Xiang, J., Matsumoto, T., Wang, Y. and Jiang, Z., "Detect Damages in Conical Shells Using Curvature Mode Shape and Wavelet Finite Element Method", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 83-93, (2013).
11. ASTM A106 / A106M, Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2010), www.astm.org
12. Ratcliffe, C.P., "A Frequency and Curvature Based Experimental Method for Locating Damage in Structures", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 122, No. 3, pp. 324-329, (2000).
13. Paya, B., Esat, I. and Badi, M., "Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rotating Machinery Using Wavelet Transforms as a Preprocessor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 5, pp. 751-765, (1997).
14. Hagan, M.T., Demuth, H.B. and Beale, M.H., "*Neural Network Design*", Pws Pub. Boston, (1996).